

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.033

集中控制思路下的煤矿工作面液压支架控制优化

宋小宁¹, 包彦明¹, 徐学东²

(1. 甘肃华亭煤电股份有限公司陈家沟煤矿, 甘肃 平凉 744199;

2. 甘肃华亭煤电股份有限公司砚北煤矿, 甘肃 平凉 744199)

摘 要:提出集中控制思路下的煤矿工作面液压支架自动控制方法。分析煤炭采集工作时多个液压支架位置之间相互的分布特征,设计基于 BP 神经网络的液压支架集中控制方法。充分发挥 BP 神经网络对液压支架多位置分布特征的良好学习能力和支架组载荷分布非线性表达能力,联合调整载荷分布和沿工作面方向不同位置的偏载系数,实现多液压支架的最优集中控制。通过实验可知:使用集中控制方法的煤矿工作面液压支架自动控制系统,具有实用性强、可靠性高等特点,比单一控制方法优势明显。

关键词:煤矿; 液压支架; 集中控制; PID 控制; BP 神经网络; 偏载系数

中图分类号:TD355 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0168-05

Centralized-Control-Oriented Optimization of Hydraulic Support Control of Coal Mine Working Face

SONG Xiaoning¹, BAO Yanming¹, XU Xuedong²

(1. Chenjiagou Coal Mine of Gansu Huating Coal and Electricity Co., Ltd., Pingliang 744199, China;

2. Yanbei Coal Mine of Gansu Huating Coal and Electricity Co., Ltd., Pingliang 744199, China)

Abstract: This paper proposes an automatic control method for hydraulic supports in coal mine working faces based on centralized control mindset. With the analysis on the distribution characteristics of multiple hydraulic support positions during coal collection work, a centralized control method for hydraulic support is designed based on BP neural network. By full utilization of BP neural network for the good learning ability of multi position distribution characteristics of hydraulic supports and the non-linear expression ability of support group load distribution, the load distribution and the offset coefficient are jointly adjusted at different positions along the working face direction, and the optimal centralized control of multiple hydraulic supports is achieved. It is known through experiments that the automatic control system for hydraulic supports in coal mine working faces using centralized control methods has strong practicality, high reliability, and obvious advantages compared to a single control method.

Keywords: coal mine; hydraulic support; centralized control; PID control; BP neural network; eccentricity factor

0 引言

液压支架控制系统的优劣直接关系到煤矿的安全生产和经济效益^[1-2]。随着煤矿开采深度的增加,工作面的地质条件越来越复杂,而传统的机械控制方式已经无法满足现代煤矿开采需求,因此,研究液压支架控制系统具有重要的现实意义^[3]。随着科技的不断进步,液压支架控制技术也在不断发展,从传统的机械控制到现代的电液控制,其控制精度和稳定性均得到了显著提高^[4]。

基于上述原因,为了煤炭高效出产,文献[5]设计了一种基于 CAN 总线调度的液压支架电液控制系统动态调度方法,通过对液压支架电液控制与通信的实时、可靠度进行优化,解决节点饥饿问题,大

幅度提升液压支架的使用效率。文献[6]以采煤工作面的自动控制技术为研究对象,从煤层的约束条件出发,通过构建多传感器融合的方法,获取精确定位,实现液压支架控制。该方法采用单一控制策略,导致液压支架的位置与采煤机的运动速度不匹配,从而影响采煤工作效率。文献[7]采用解耦补偿方法,使支架保持平衡,并且利用修正的滑动模态趋近律,设计自适应滑动模态同步的位置控制方法,实现液压支架控制。该方法未有效地解决液压支架的位移-力耦合问题,导致控制效果有限。文献[8]设计了一种基于非线性滑模控制理论的自适应滑模控制方法,通过引入非线性滑移面,并且考虑观测器的动力学特性,在有限时间内减小控制器和观测器的误差。该方法存在的弊端是无法适应

第一作者简介:宋小宁(1983—),男,甘肃华亭人,工程师,本科,研究方向为机电运输管理,511728715@qq.com。

复杂系统的多变性,从而限制了控制的优化效果。为此,本文在集中控制思路下提出了煤矿工作面液压支架控制优化方法。

1 单一控制下多液压支架位置和支架载荷分布计算

在单一控制下多液压支架位置和支架载荷分布是集中控制中的关键因素^[9]。通过计算液压支架的位置分布和载荷分布,实现液压支架与采煤机的配合,确保液压支架能够跟随采煤机的运动轨迹^[10]。具体分析过程如下。

假定采煤机以 v 的速度在矿井中移动,采煤机头部和中间的距离为 $S = \int_0^t vt + S_0$,采煤机位置为 $K = \text{int}(\int_0^t vt + S_0/D)$,则通过力学原理和载荷传感器的采集,可以获得单个液压支架承受的载荷大小和载荷分布情况^[11]。液压支架的运动学方程 $F_j(j=1,2,3)$ 可以从采煤机的位置得到,如式(1)所示。

$$F_j = \text{int}(\int_0^t vt + S_0/D) + (-1)^{n_1+n_2} G_j \quad (1)$$

式中: t 为运动时间; S_0 为采煤机的位移距离; $\text{int}(\cdot)$ 为整数函数; D 为液压支架长度; n_1 为采煤机的移动方向; n_2 为与采煤机的相对方位, G_j 为第 j 个支架的初始预紧力。如果采煤机由头部到尾部运动时, $n_1=1$;尾部到头部运动时, $n_1=0$;液压支架运动落后采煤机时, $n_2=0$;液压支架运动超过采煤机时, $n_2=1$ 。进一步分析这些数据,可以获得液压支架组内整体的载荷分布特征:

$$\theta = D \sum_{\kappa} (\vartheta \times \kappa) \quad (2)$$

式中: θ 为总载荷; ϑ 为单个液压支架载荷; κ 为该支架在组内的数量。根据液压支架的工作原理和载荷特点,建立以下公式描述液压支架的载荷分布^[12]:

$$\vartheta_{\max} = \max(\sum_K \vartheta) \quad (3)$$

$$\vartheta_{\min} = \min(\sum_K \vartheta) \quad (4)$$

$$\bar{\vartheta} = \sum_K \vartheta / \kappa \quad (5)$$

通过式(3),可以找到液压支架组内承受最大载荷 $\vartheta_{\max}$ 的支架;通过式(4)可以找到组内承受最小载荷 $\vartheta_{\min}$ 的支架,从而判断是否存在未充分利用的液压支架。 $\bar{\vartheta}$ 为单个液压支架的平均载荷。

通过基于力学原理和传感器采集的数据,计算液压支架的位置分布特征和支架载荷分布特

征,可为液压支架的自动控制系统提供准确、可靠、高效的控制策略。

2 基于 BP 神经网络下液压支架集中控制

在液压支架集中控制过程中,不同位置的液压支架承受的载荷存在差异^[13]。因此,为了实现最优集中控制,并且解决液压支架的位移-力耦合问题,需要根据载荷分布情况来联合调整液压支架的控制策略。采用 BP 神经网络可以更好地反映液压支架位置分布和载荷分布的非线性特征,提高控制方法的准确度。基于煤矿液压支架集中控制模型,将位置和载荷参数与神经网络模型结合^[14-16],设计基于 BP 神经网络的液压支架控制方法。假设 $U_0(k)$ 、 $U_1(k)$ 分别是主控计算机获得的采煤机位置输入信号和挖掘深度输入信号, $Y_0(k)$ 、 $Y_1(k)$ 是采煤机位置和挖掘深度实际输出的系统反馈信号,液压支架可根据信号进行相应的控制动作。

结合位置和载荷参数及 BP 神经网络模型,依据系统的工作状况,对沿工作面方向不同位置的偏载系数 K_p 、 K_l 、 K_d 进行持续地修改,以获得参数最优解,实现控制优化^[17]。

BP 神经网络的学习方法包括前向传播和反向传播两种算法,其中输入层的节点是 3 个,即输入设定点 $y(k)$ 、偏差信号 $e(k)$ 、偏差改变量 $r(k)$,隐含层包括 $i(i=0)$ 个节点。这些子系统通过控制学习算法对控制速率进行合成,并和联合控制器共同构成一个双入双出的神经网络联合控制器^[18-20]。

神经网络隐藏层的输入函数 $\text{net}_i(k)$ 和输出函数 $o_i(k)$ 分别表示为:

$$\text{net}_i(k) = \sum_{i=0}^4 \omega_i(k) y_r \quad i = [0,4] \quad (6)$$

$$o_i(k) = \bar{\vartheta} f[\text{net}_i(k)] \quad i = [0,4] \quad (7)$$

式中: y_r 为输入层设定值; $\omega_i(k)$ 为隐藏层的连接指数; f 为激活函数,一般取值正负对称的 Sigmoid 函数:

$$f[\cdot] = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (8)$$

神经网络输出层的输入函数 $\text{net}_m(k) = \sum_{i=0}^4 \omega_m(k) y_r$,则输出函数 $o_i(k)$ 表示为

$$o_m(k) = g[\text{net}_m(k)] = g\left[\sum_{i=0}^4 \omega_m(k) y_r\right] \quad m = [0,2] \quad (9)$$

式中: $\omega_m(k)$ 为输出层的连通性指标; g 通常取为

正对称的 Sigmoid 函数的活化函数:

$$g[\cdot] = \frac{1}{2} [1 + \tanh(x)] = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (10)$$

位置和沿工作面方向不同位置的偏载系数修改为

$$\begin{cases} O_0(k) = K_P \\ O_1(k) = K_I \\ O_2(k) = K_D \end{cases} \quad (11)$$

输出层的连接指数可调整为

$$\Delta\omega_m(k+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_m(k)} + \Delta\omega_m(k) = \eta \delta_m o_m(k) + \Delta\omega_m(k) \quad (12)$$

式中: η 为机器学习效率; ∂ 为惯性指标。计算产生的误差影响能够经过改变学习效率 η 来补偿。

同样,可以得出隐藏层的连接指数调整公式为

$$\Delta\omega_i(k+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_i(k)} + \Delta\omega_i(k) = \eta f[\text{net}_i(k)] \sum_{m=1}^2 \delta_m \omega_m(k) o_i(k) + \Delta\omega_i(k) \quad (13)$$

利用预测模型的 BP 神经网络对目标进行建模,并将 $y(k+1)$ 替换为由模型计算出的预测值 $\hat{y}(k+1)$,解决了权重校正公式中因符号函数 $\text{sgn}\left(\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}\right)$ 而导致的误差问题,也就是用预测值 $\frac{\partial \hat{y}(k+1)}{\partial u(k)}$ 替代 $\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}$ 进行权重校正。预测模型有线性和非线性两种。当多液压支架表现为强非线性时,将其视为一个单输入输出的非线性系统。

$$y(k) = f'[y(k-1), \dots, y(k-N_y), u(k-1), \dots, u(k-N_u)] \quad (14)$$

式中: $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别为非线性系统的输入和输出值; N_y 和 N_u 分别为 y 和 u 的阶次, $f'[\cdot]$ 为非线性系统函数。

构造一个具有输入节点 $N_y + N_u + 1$ 、隐藏层节点 Q 和输出节点 $\hat{y}(k+1)$ 的 BP 神经网络,该 BP 神经网络是一个非线性预测模型,可以得出 $\frac{\partial \hat{y}(k+1)}{\partial u(k)}$ 。利用

BP 神经网络的学习能力和非线性表示能力,在线智能化地调整位置和载荷分布及沿工作面方向不同位置的偏载系数,优化控制系统。

3 实验与结论

实验时选择一台符合工作要求的液压支架,

并确保其工作状态为正常。在液压支架的关键部位安装位移传感器、压力传感器和载荷传感器等,测量液压支架的运动特性和承载能力。采用数据采集系统,记录和分析测得的位移、压力和载荷等数据。设计并设置液压支架的不同位置,如收护帮板的位置、推滑操作等。通过控制液压支架的位置变化,测试其在不同位置下运动特性。通过施加不同载荷,测试液压支架在不同载荷下承载能力。在设置过程中使用 MATLAB 编程来设计实验程序并对液压支架进行控制。实验选择的液压支架控制器图 1 所示,该控制器能按照煤矿工作面发送的工序指示,对采煤机进行自动跟踪,并能实现自动拉架、自动推卷等采煤工作流程。

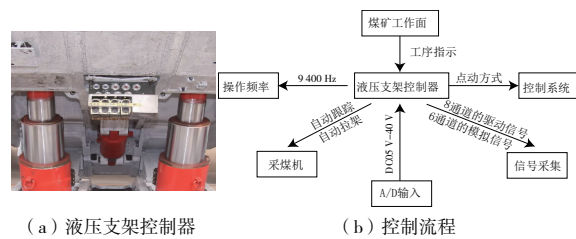


图 1 液压支架控制器及控制流程图

使用如图 1(a) 所示的液压支架控制器,按照设定的位置变量进行液压支架的操作控制,以实现液压支架在不同位置的运动。在采煤机头部至中间位置的距离上进行测量,通过施加不同大小和分布的载荷来模拟不同的工作条件。在完成实验准备后,设置集中控制思路下煤矿工作面液压支架控制优化方法的参数,参数设置如表 1 所示。

表 1 煤矿工作面液压支架控制优化方法参数

参数符号	含义	数值
$\vartheta_{\max}$	组内承受最大载荷/kN	4 600
η	机器学习效率	0.001
κ	支架在组内的数量	10
∂	惯性指标	0.247
N_y	非线性系统输入的阶次	4
N_u	非线性系统输出的阶次	3

在完成控制优化方法参数设置后,为验证所提方法的适应性及动力学稳定性,以设定的实验环境为控制系统的输入层,得到液压支架在平衡下的位移阶跃响应如图 2(a) 所示。采用阶跃信号在 18 s 时模拟煤矿工作面基础顶部破裂、垮塌时的冲击作为冲击环境,得到受到冲击下的液压

支架位移阶跃响应如图 2(b) 所示。

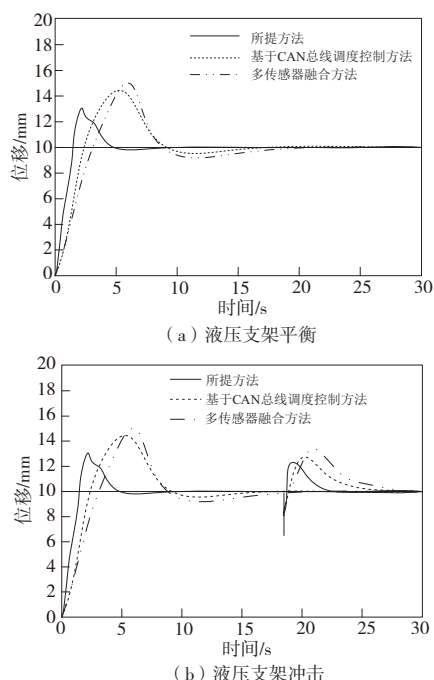


图 2 位移阶跃响应分析

由图 2(a) 可以看出,在液压支架平衡状态下,多传感器融合方法达到稳定状态的时间为 17.1 s,过程中超出调节稳定量 1.5 mm;基于 CAN 总线调度控制方法达到稳定状态的时间为 16.0 s,过程中超出调节稳定量 0.8 mm;所提方法达到稳定状态的时间为 7.0 s,过程中超出调节稳定量 0.4 mm。使用所提方法控制液压支架,超出的调节稳定量最小,主要原因在于所提方法根据煤炭采集工作时多个液压支架位置之间的分布特征,联合调整载荷分布和沿工作面方向不同位置的偏载系数,实现多液压支架的最优集中控制。

由图 2(b) 可以看出,所提方法下的液压支架对负载响应更快,其他两种方法的响应较慢,且波动较大。综上所述,在液压支架控制中,所提方法通过分析煤炭采集工作时多个液压支架位置之间的分布特征,可以获取液压支架的位置信息,了解各个支架的相对位置关系。然后,利用 BP 神经网络的良好学习能力和非线性表达能力,能够准确地学习和表达液压支架位置与负载之间的复杂关系。当冲击加载时,这种集中控制策略能够迅速预测并调整液压支架的位移和响应,使其更快地适应负载变化,实现对负载的更快响应。

在上述实验分析后,为验证所提方法的煤矿工作面液压支架控制准确性,以位移误差为衡量指标,并且在不同荷载条件下进行实验,该指标值

越小,则说明所提方法的控制越准确。不同方法的实验结果如图 3 所示。

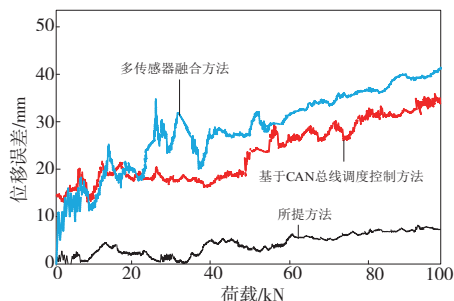


图 3 不同荷载条件下控制位移误差分析

根据图 3 可知,3 种控制方法的位移误差均随着荷载的增加而增大。由曲线变化取值可知,所提方法的位移误差远远低于对比方法,并且位移误差增加较小。在荷载达到 100 kN 时,所提方法误差仍低于 10.0 mm,而此时基于 CAN 总线调度控制方法的位移误差达到了 35.3 mm,多传感器融合方法的位移误差达到了 42.1 mm。由此可知,所提方法的位移误差对比方法低了 20.0 mm 以上。由此可见,有效降低了不同荷载条件下的煤矿工作面液压支架控制位移的误差,具备较好的控制准确性。

4 结语

本文针对煤矿工作面液压支架控制存在的问题,提出集中控制思路下的煤矿工作面液压支架自动控制方法。通过设计基于 BP 神经网络的液压支架集中控制方法,充分发挥 BP 神经网络的学习能力和支架组载荷分布非线性表达能力。通过联合调整载荷分布和沿工作面方向不同位置的偏载系数,实现多液压支架的最优集中控制。实验结果表明,所提出的自动控制方法能够提升液压支架的控制效率和精确度,使液压支架能够更好地适应煤矿机械化生产的需求。

参考文献:

- [1] 王斌,张杰,刘辉,等. 南梁煤矿近距煤层采空区下开采工作面矿压规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(2): 210-218.
- [2] 崔悦,张伟,王亚刚. 用直接综合法设计的微分先行鲁棒 PID 控制器[J]. 控制工程, 2021, 28(1): 14-22.
- [3] 沈佳兴,徐平,范中海,等. 防冲液压支架点阵吸能结构设计及其性能分析[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(1): 99-105.
- [4] 郑凯. 一种补偿液压过滤装置压力损失的智能系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 133-135, 156.

- [5] 王培恩,霍鹏飞,田慕琴,等. 液压支架电液控制系统通信调度策略研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 146-151.
- [6] 于波. 巴彦高勒煤矿采煤工作面自动化控制关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(增刊1): 63-68.
- [7] GUO Y N, ZHANG Z, LIU Q Y, et al. Decoupling-based adaptive sliding-mode synchro-position control for a dual-cylinder driven hydraulic support with different pipelines[J]. ISA Transactions, 2022, 123: 357-371.
- [8] ZOU Q. Extended state observer-based finite time control of electro-hydraulic system via sliding mode technique[J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(5): 2311-2327.
- [9] 梁敬梅,李翠花. 基于神经网络逼近器的液压支架多缸协同控制[J]. 煤炭技术, 2023, 42(5): 223-225.
- [10] 闫茂里,李肖,王伟,等. 模糊PID控制器在浸出车间石蜡加热器温度闭环控制中的应用[J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 98-102, 120.
- [11] 王磊,孙凯,袁瑞甫,等. 基于EtherCAT的液压支架智能控制系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 53-63.
- [12] 马志涛,付翔,李浩杰,等. 液压支架跟机移架控制异常工况模式识别方法[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 36-43.
- [13] 韩会军,雷亚军,张金虎,等. 10 m 超大采高液压支架关键结构及其承载特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 1993-2004.
- [14] 王云飞,赵继云,张鹤,等. 基于神经网络补偿的液压支架群推移系统直线度控制方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 174-185.
- [15] 李珂,陈吉顺,张品,等. 液压支架大流量换向阀稳态液动力计算与补偿方法[J]. 液压与气动, 2024, 48(8): 77-92.
- [16] 曹连民,张德抗,赵东瑞,等. 膏体充填支架液压控制系统特性分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(19): 141-145.
- [17] 梁占泽,周澍,陈海舰. 煤矿综采工作面作业人员定位与液压支架的协同控制方法研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 217-222.
- [18] 韩会军,王国法,许永祥,等. 6~10 m 厚煤层超大采高液压支架及其工作面系统自适应智能耦合控制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 276-288.
- [19] 赵丽娟,张展鹏,曹正,等. 50 000 kN 液压支架试验台垂直加载液压缸同步控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 195-201.
- [20] 孙铭泽,王永强,常亚军,等. 液压支护机器人群组移架一致性分布式协同控制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊2): 1208-1222.

收稿日期:2024-01-03

(上接第 158 页)

- [2] 王迅. 冗余 4-RRR 并联机器人机构的运动学分析与优化设计[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2024, 24(4): 26-34.
- [3] 陈晶,郭倩,朱伟. 一种并联混合机的运动学分析与尺度优化设计[J]. 机械传动, 2024, 48(10): 61-67.
- [4] 张蔚,陈浩. 一种平面二自由度并联机构工作空间分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 56-61.
- [5] 王冰,聂旭萌,韩书葵. 一种平面二自由度并联机器人速度性能与运动学参数关系研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(21): 46-49.
- [6] 吴伟峰,张伟中,钱荣. 一种新型二自由度并联机构的运动学及静力学分析[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 206-210.
- [7] 王冰,李东阳,聂旭萌. 一种平面二自由度并联机器人机构刚度性能与运动学参数关系研究[J]. 机械设计与制造, 2015(3): 170-172, 176.
- [8] 李占贤,赵永杰. 一种二自由度并联机器人机构灵活性研究[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(2): 30-31, 39.
- [9] 孟齐志,谢福贵,刘辛军,等. 高速高负载并联机器人设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 416-426.
- [10] SNYMAN J A, DU PLESSIS L J, DUFFY J. An optimization approach to the determination of the boundaries of manipulator workspaces[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 447-456.
- [11] 刘志忠,柳洪义,罗忠,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 230-235.
- [12] 王迅. 平面并联机器人机构工作空间边界的元胞搜索算法[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(10): 52-56.
- [13] 任佳,雷虎. 一种新型矢栅转换的平行线扫描算法[J]. 科技信息(学术研究), 2008(9): 426-427.
- [14] 王娜,于敏,张永选,等. 新型 2URU-2RSS 并联机器人机构运动学分析多目标优化[J]. 机床与液压, 2024, 52(17): 28-38.
- [15] 张伟中,冯邵江,袁鑫宏,等. 2-PRU-PRRPa 并联机构运动学分析与性能优化[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 497-506.
- [16] 伞红军,杨晓园,陈久朋,等. Delta 并联机器人运动学性能分析与结构参数优化[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 446-458.
- [17] 丰晓东,赵耀虹,李瑞琴,等. 2-CPR/RPU 并联机构的构型设计及工作性能分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 4902-4908.
- [18] 沈惠平,孔祥超,李菊,等. 正解符号化且运动解耦的 2T1R 并联机构拓扑设计与分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 449-458.
- [19] 范昆龙,王生海,仇伟晗,等. 3UPU-UP 并联平台可操作性与工作空间分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6935-6942.
- [20] 李彦苍,徐培东. 基于自适应步长和莱维飞行策略的改进狼群算法[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(12): 80-95.

收稿日期:2024-07-01